DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.265 **中图分类号**：TN014 **文献标志码**：A

无线电能传输系统参数辨识技术研究综述

张玉旺[1]，都义彬[1](中国电源学会学生会员)，张 岩[1]，郭彦杰[2]，薛 明[2]
(1.河北科技大学电气工程学院，石家庄 050018；2.河北工业大学电气工程学院，天津 300401)

摘要：随着无线电能传输 WPT(wireless power transfer)技术的发展，针对 WPT 系统的参数辨识技术受到广泛关注。高效、精确的参数辨识方法能简化系统设计与控制策略，实现关键参数在线监测。首先对 WPT 系统参数辨识与控制方式进行了总体阐述；然后将目前的 WPT 系统参数辨识方法分为互感辨识、互感和负载同时辨识及多参数联合辨识 3 种类别，并分别对每类辨识方法的实现方式和关键问题进行了分析；最后，讨论了参数辨识技术所面临的重要问题和技术挑战，并对其未来应用前景进行了展望。

关键词：综述；无线电能传输；系统设计；参数辨识；控制方式

Review of the Research on Parameter Identification Technology for Wireless Power Transfer Systems

ZHANG Yuwang[1], DU Yibin[1], *Student Member*, *CPSS*, ZHANG Yan[1], GUO Yanjie[2], XUE Ming[2]
(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: With the development of wireless power transfer (WPT) technology, the parameter identification technology for WPT systems has attracted extensive attention. Efficient and accurate parameter identification methods can simplify system design and control strategy, and achieve online monitoring of key parameters. The parameter identification and control methods of WPT system are first summarized. Then, the current parameter identification methods of WPT system are divided into three categories: mutual inductance identification, simultaneous identification of mutual inductance and load, and multi-parameter joint identification. Meanwhile, the implementation methods and key problems of each type of identification method are analyzed. Finally, the important problems and technical challenges of parameter identification technology are discussed, and the future application prospects of parameter identification technology are forecasted.

Keywords: Review; wireless power transfer (WPT); system design; parameter identification; control mode

相比于传统的接触式充电，无线电能传输 WPT(wireless power transfer)具有可靠性与安全性更高、占地空间小、使用方式灵活、不易受外界环境因素干扰等优点，并可为某些特殊应用场合(如人体植入式医疗设备、化工、矿井、油田钻采、高电压环境、水下探测等)的无线供电问题提供解决方案[1-6]。随着理论成果研究层面向商业化发展的进程不断加快，WPT 技术已经在电动汽车、无人机、植入式医疗设备、消费类电子产品、家用电器等领域得到了一定的推广应用[7-9]。

由于 WPT 系统结构的特殊性，其研究涉及多项技术。以电动汽车 WPT 系统为例，研究主要涉及磁耦合机构和补偿网络设计技术、高频电力电子变换器设计技术、线圈定位技术、金属异物检测技术及参数辨识和控制技术等[10-15]。在 WPT 系统应

收稿日期：2024-03-01；**修回日期**：2024-04-10；**录用日期**：2024-04-26；**网络首发日期**：2024-06-13
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52077153)；河北省高等学校科学技术研究资助项目(ZD202102)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52077153; Hebei Provincial Higher Education Science and Technology Research Project under the grant ZD202102

用中，存在多种参数变化。例如，线圈位置的偏移与传输距离的变化将影响线圈的互感、自感参数[16-17]；在充电过程中，电池电压的变化将影响 WPT 系统的等效负载参数；系统长时间工作时，温度的升高将影响谐振电容参数。上述参数的改变将影响系统特性，参数辨识技术则有助于制定相应的控制策略，确保系统的高效性和稳定性。例如，基于互感和负载的辨识结果，通过发射端控制可实现 WPT 系统的最大效率追踪[18-19]；通过对补偿电容或线圈自感参数的辨识，调节系统工作频率则可避免系统偏离谐振工作点，保证系统高效传输。此外，为了确保系统长时间工作的稳定性和安全性，需要对相关电气参数进行实时监测。例如，辨识电池负载的荷电状态 SOC(state of charge)，可帮助管理电池的充放电过程，避免过充或过放，延长电池的使用寿命[20]。因此，实现 WPT 系统关键参数的在线辨识，在制定控制策略、跟踪系统运行状态及确保系统安全性和稳定性方面具有重要作用。

参数辨识技术因其重要性已得到越来越多涉及 WPT 领域的科研机构和高校的关注。国外如东京大学、奥克兰大学、南洋理工大学等研究团队，国内如香港大学、香港理工大学、西南交通大学、华中科技大学、中国科学院电工研究所、天津大学、华南理工大学、哈尔滨工业大学、重庆大学等研究团队，已经在 WPT 参数辨识技术方面进行了深入研究，并取得了一定进展。然而，有关参数辨识技术的综述文献相对较少。

本文以近年来的研究进展为基础，将目前的 WPT 系统参数辨识方法分为互感辨识、互感和负载同时辨识及多参数联合辨识 3 个方面，分别对其实现方式和关键问题进行分析讨论。在此基础上，探讨了参数辨识技术亟待解决的问题，并对其未来应用前景作进一步展望。

1 无线电能传输系统与参数辨识技术应用介绍

以电动汽车应用场景为例，分析参数辨识技术在 WPT 系统中的应用。电动汽车 WPT 系统结构如图 1 所示，图中：M 为发射线圈与接收线圈之间的互感；L_p 为发射线圈自感；L_s 为接收线圈自感。

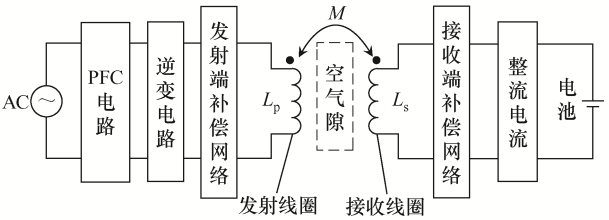


图 1 电动汽车 WPT 系统结构

Fig. 1 Structure of WPT system for electric vehicles

电网的工频交流电通过功率因数校正 PFC (power factor correction)电路进行整流和升压，转换成直流电，逆变电路将直流电转化为高频交流电。高频交流电经过发射端补偿网络后，利用发射线圈与接收线圈的电磁耦合，传输至接收端。整流电路将接收端接收的高频交流电转化为直流电，给电池充电。在电动汽车开始充电前，停车位置的不同将影响发射端线圈与接收端线圈的相对位置，进而影响互感参数。对于传输距离较近的 WPT 系统，线圈之间的相对位置变化甚至会引起自感参数的变化[16]。在充电过程中，电池电压将逐渐升高，随着恒流充电与恒压充电阶段的切换，系统等效负载(充电电压/充电电流)将随之改变。上述参数的变化将影响系统软开关、输出功率和传输效率等特性。为了实现系统高效输出和稳定充电，需要采用一些控制措施。目前的控制方式可分为发射端控制、接收端控制及发射端与接收端协同控制[21-22]。

接收端控制通常需要在全桥整流电路与电池负载之间增加电压控制电路，或采用可控整流电路实现输出控制，该控制方式仅针对单一性能指标(传输效率、输出电压或电流)。发射端与接收端协同控制方式可以同时对多个指标进行优化控制。上述 2 种控制方式均需在接收端增加额外的控制电路。发射端控制可通过接收端与发射端之间的无线通信，或利用参数辨识技术获取负载或互感信息[23-27]，进而直接利用发射端控制电路进行控制。在实际应用中，无论系统采用哪种控制方式，其前提条件是互感参数必须在可工作范围内，因此需要

进行参数预辨识处理。

综上所述，结合参数辨识结果的控制方式可以满足系统控制需求，简化系统设计，因此参数辨识技术逐渐成为实现 WPT 系统结构简化和稳定输出的关键环节。

2　参数辨识技术研究现状

综合目前国内外参数辨识技术的研究成果，针对其辨识对象，可将参数辨识技术分为互感辨识、互感与负载同时辨识和多参数联合辨识技术 3 类。下面分别对每类参数辨识技术进行分析讨论。

2.1 互感辨识

互感参数在无线充电系统中扮演着十分重要的角色，对其辨识可以辅助判断线圈相对位置，确定系统工况。在互感参数辨识方面，国内外已有较多研究成果。例如，文献[23]在频域上，分析了逆变器输出阻抗特性，得到了互感与逆变器输出阻抗的关系，进而基于测量的逆变器输出电压、电流和相位信息，实现了互感参数的估计；文献[24]在时域上，基于 S-S 补偿拓扑的 WPT 系统模型，推导了含有互感参数的四阶时域微分方程，同样通过采集逆变器输出电压、电流和相位信息，对互感进行估计。上述方法需要采用过零检测电路或离散傅里叶变换获取基波相位信息，对检测电路或数字信号处理器的要求较高，且均需提前确定负载参数，不适用于负载变化的系统。

为了避免负载对互感辨识的影响，实现在负载未知情况下的互感辨识，文献[25]利用硬件切换方法，实现了耦合系数的估计。系统接收端采用可控整流桥，在估计过程中，可控整流桥下桥臂的 2 个开关器件导通，使接收端补偿网络输出端呈现短路状态；然后利用扫频法，通过逆变器输出电压和电流的相位信息确定满足系统谐振条件的临界频率，进而实现对耦合系数的估计。

文献[26]利用 WPT 系统软起动过程和电池充电特性实现了互感参数辨识。在软起动过程最开始的一段时间内，系统输出电压较低，未达到电池有效充电电压，全桥整流二极管处于开路状态。此时，仅需获取逆变器输出电压和电流的有效值便可实现互感参数的估计。上述方法的特点在于无需考虑负载参数，且辨识过程需要在系统正常工作前完成。对于充电过程中互感参数变化的应用场合，如移动式 WPT 系统，此类方法不适用。

此外，为了减少参数辨识时的数据采集量，有些研究通过利用单一采样数据中的基波和谐波信息实现了互感参数估计。文献[27]针对采用 S-S 补偿的 WPT 系统，推导了包含逆变器输出电流基波和 3 次谐波的互感估计方程，进而仅需采集逆变器输出电流数据，根据求解的逆变器输出电流基波和 3 次谐波幅值便可实现互感参数辨识。文献[28]提出了一种基于逆变器输出电流 5 次谐波的互感估计方法，通过分析基于 SP 补偿的 WPT 系统特性，得到了 5 倍频下的系统等效电路，如图 2 所示。图中：U_{IN} 为逆变器输出电压；C_p 为一次侧串联补偿电容；r_p 为发射线圈内阻；C_s 为二次侧并联补偿电容；r_s 为接收线圈内阻；R_L 为整流器等效输入电阻；$U_{IN,5}$ 为逆变器输出电压中的 5 次谐波。在 5 倍工作频率下，一、二次侧补偿电容等效容抗较小，可近似短路，此时等效电路中仅包含线圈自感和互感参数。通过采集逆变器输出电流数据，利用傅里叶变换求解 5 次谐波幅值即可获得互感参数。尽管上述方法在互感参数辨识中仅需采集逆变器输出电流，减少了数据采集量，但均需使用高次谐波信息。由于高次谐波分量占比较小，易受到采样误差和计算误差的影响，因此需重点关注此类方法在参数辨识的精度和准确率。

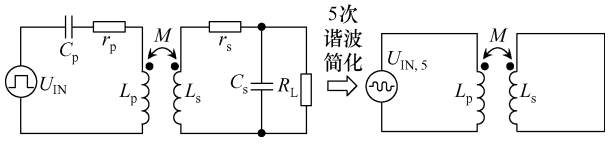


图 2　考虑 5 次谐波的 SP 补偿拓扑等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of SP compensation topology considering the fifth harmonic

2.2 互感与负载同时辨识

在实际应用中，WPT 系统主要面临互感与负

载参数均变化的场景，这使得系统在进行参数辨识和控制时需兼顾互感与负载参数的估计。目前有一些研究采用硬件方案，通过增加额外的通信电路或控制电路，实现了互感与负载的同时估计。例如，文献[18]针对多发射端-单接收端无线充电系统，利用 RF-LINK 无线通信，将接收端辨识的负载信息传输至发射端，并结合发射端采集的逆变器母线电压、电流信息实现了多个互感参数的辨识；文献[19]为了实现变互感下输出电压和最大效率的优化控制，在逆变电路前和整流电路后分别加入升降压电路，负载信息通过接收端采集的电压电流计算获得，并通过发射端与接收端控制芯片 STM32F407 之间的无线通信，将负载信息传输至一次侧，同时结合逆变器前级升降压电路占空比的增量值，实现互感的动态估计。由于上述方法在发射端与接收端之间增加了无线通信，在实际应用中需要关注磁耦合机构对通信链路的电磁干扰，避免出现误码与丢帧问题。文献[29]提出了一种基于附加补偿电容器的参数辨识方法，系统采用 S-S 补偿拓扑，通过在发射端串联补偿电容两端并入包含开关器件和附加电容的新支路，使系统工作在有无附加补偿电容的 2 种状态，进而分析互感和负载参数的辨识方程，最后通过采集 2 种发射端电路谐振条件下逆变器输出的电流有效值，实现了负载和互感的估计。文献[30]提出了基于附加辅助逆变器的负载和互感参数辨识方法，其系统结构如图 3 所示。图中：M_I 为主逆变器；A_I 为辅助逆变器；U_{dc1} 和 U_{dc2} 分别为 M_I 和 A_I 的母线电压；S_1~S_8 为 M_I 和 A_I 的开关器件；U_{ab1} 和 U_{ab2} 分别为 M_I 和 A_I 的输出电压；T_1 和 T_2 分别为 M_I 和 A_I 的输出耦合变压器；S 为开关，用于控制 A_I 的切入。为了使系统在参数辨识过程中仍能稳定输出，开关 S 断开后，需调节 A_I 的频率和移相角，使 S 断开前、后的系统输出电压基本保持不变。由于 A_I 的工作频率与 M_I 不同，S 断开后，发射线圈电流的稳态波形为拍频波，如图 4 所示，图中：$i_{p,peak}$ 为由发射线圈电流峰值构成的包络线；$i_{p,mode2}$ 为发射线圈电流。拍频波的包络线峰谷值由 A_I 决定，同时与负载和互感参数有关。通过采集求解发射线圈电流拍频波包络线的峰值和谷值，并根据发射线圈电流与互感、负载的关系式，即可实现互感和负载的辨识。

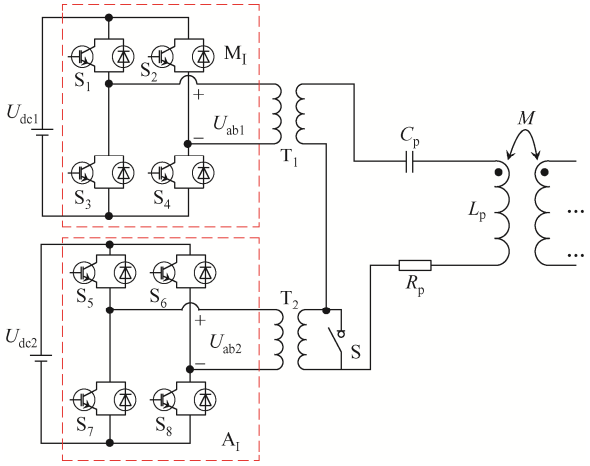


图 3 增加辅助逆变器的 WPT 系统结构

Fig. 3 Structure of WPT system with additional auxiliary inverter

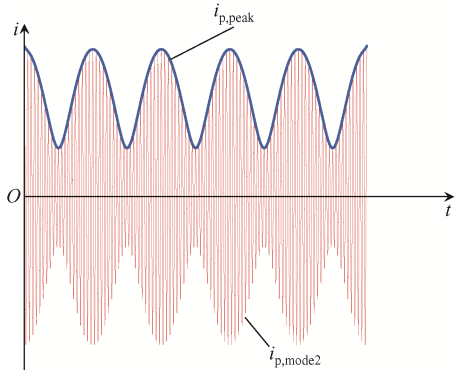


图 4 S 断开后发射线圈电流波形

Fig. 4 Current waveforms of the transmitter coil after S is turned off

尽管文献[29-30]实现了对负载和互感的同时估计，但需要增加额外的辅助控制电路，系统设计复杂。因此，有研究人员提出了不增加额外辅助电路的负载和互感辨识方法。文献[31]针对接收端采用并联补偿的 WPT 系统，提出了基于发射端信息的互感和负载参数辨识方法。通过频率控制，使高频逆变器工作于零相角状态，即逆变器输出阻抗呈纯阻性，进而采集逆变器输出电压和电流数据，通过稳态参数辨识模型实现互感和负载的辨识；文献[32]提出了一种基于间谐波的 WPT 系统参数辨识方法，当发射端高频逆变器采用脉冲密度调

制时，会产生一系列间谐波，通过分析基波频率和间谐波频率下的系统特性，并利用逆变器输出电压和电流中的间谐波信息，实现了互感与负载的辨识。

此外，随着人工智能的迅猛发展，研究人员开始将人工智能算法应用于 WPT 系统中，解决互感与负载的辨识问题。文献[33]针对 S-S 补偿的 WPT 系统，建立了考虑高次谐波的稳态电路模型，进而得到系统电路参数与状态变量之间的数学关系，在此基础上引入遗传算法，将互感和负载参数辨识问题转化为寻优问题，通过采集逆变器直流母线电压和发射线圈电流，实现了互感和负载参数的辨识，最大辨识误差分别为 3.2%和 7.4%。文献[34]针对双边 LCC 补偿的 WPT 系统，提出了基于 TensorFlow 神经网络的辨识方法。首先，基于 TensorFlow 框架建立了一个 5 层的互感与负载辨识全连接神经网络辨识模型；其次，获得大量不同偏移和传输距离下的互感参数数据集，并输入模型中进行离线训练；最后，采集逆变器输出电流并测量线圈传输距离，利用辨识模型求解互感和负载，最大辨识误差分别为 2.73%和 2.38%。该方法由于使用了额外的红外测距传感器，为参数辨识模型提供了传输距离参数，有效减小了辨识误差。

2.3 多参数联合辨识

随着对 WPT 技术研究的深入，为了满足多种实际应用需求，提高系统可靠性，参数辨识对象不再仅局限于单互感和负载，而需要涉及但不限于线圈自感、谐振电容、充电电压和电流、电池状态、多互感等参数。

综合考虑系统控制、性能优化和状态监测等多方面需求，文献[35]提出了一种基于直流输入电流和移相角的多参数联合辨识方法，实现了电池电压、充电电流和系统等效负载阻抗的辨识。该方法通过分析系统基波和谐波模型，采用线性叠加定量描述系统特性与参数之间的关系，进而采集逆变器直流输入电流和移相角，实现系统等效负载阻抗的辨识，接着，基于等效负载阻抗辨识结果，利用整流桥输入电压和逆变器输出电流的传输函数，实现了电池电压和充电电流参数的辨识。值得一提的是，该方法不仅所需的采集信息比较容易获得，且推导了整流桥输入阻抗阻性和感性成分与电池负载的量化表达式，这是现有多数文献未曾考虑的一点。文献[36]利用整流桥输入阻抗的量化关系式进一步实现了电池 SOC 的估计，且最大绝对误差小于 0.074 6。

尽管文献[35-36]在整流桥输入阻抗计算和多参数估计方面的研究具有重要价值，尤其是尝试了电池 SOC 的估计，但其辨识方法仅基于离线数据进行分析，且未考虑线圈位置的变化，面对复杂应用场景需进一步优化。文献[37]在上述研究的基础上提出了一种互感和多充电参数的在线实时辨识算法。辨识模型中，预估参数与输入参数的关系采用高阶隐函数表示，为了从高阶隐函数方程中实时获得互感和充电参数的辨识结果，引入了一种改进型最小均方自适应滤波算法。实验结果表明，该辨识算法的在线辨识时间约为 5.6 ms，满足系统动态响应时间需求，辨识误差最大的估计参数是电池等效负载，最大辨识误差为 5%。

在宽耦合应用场景中，线圈位置和传输距离的变化不仅影响互感，对线圈自感参数也有显著影响[38]，故为了系统稳定控制和性能优化，应对线圈自感参数进行辨识。针对这一问题，文献[39]提出了基于可变开关电容的双边线圈自感和互感参数辨识与优化方法。文中 WPT 系统补偿网络拓扑采用 LCC/S 补偿，但与传统 LCC/S 补偿电路设计不同，其发射端与接收端串联补偿电容采用可变开关电容进行设计，如图 5 所示。图中：U_s 为一次侧逆变器母线电压；C_F 为串联谐振滤波器的电容；L_F 为串联谐振滤波器的电感；L_1 为一次侧补偿电感；C_1 为一次侧并联补偿电容；C 为二次侧整流器输出滤波电容。同时，整流桥输出端采用 1 台继电器与负载相连。当辨识互感与发射线圈自感时，开关电容中的开关与继电器均保持断开状态。通过采集额定工作频率下的发射线圈电流与接收线圈电压实现互感参数辨识，其中接收线圈电压需通过蓝牙通信传递给一次侧；然后切换逆变器工作频率，采集

发射线圈电流实现发射线圈自感辨识；接着使继电器闭合，负载接入电路，再次采集接收线圈与发射线圈电流，实现接收线圈自感估计；在完成参数估计后，调节可变开关电容值以满足系统新的谐振状态，进而优化系统性能。

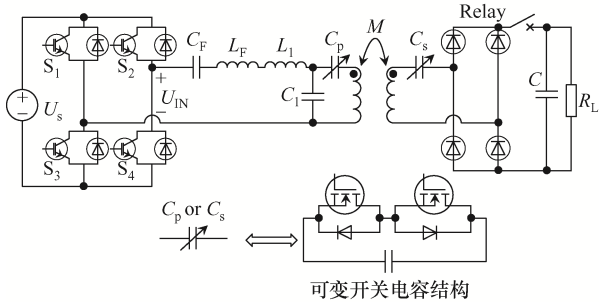


图 5 基于可变开关电容的 WPT 系统

Fig. 5 WPT system based on variable switching capacitors

此外，从系统安全性和可靠性角度，为了监测老化或其他因素对补偿电容的影响，包含补偿电容的多参数辨识方法被研究[40-41]。文献[40]基于特殊稳态计算法[42]，在考虑基波和 3 次谐波的情况下，分析了系统时域特性并采用正弦和余弦系数表示。进而推导了包含互感、输出电压、补偿电容、接收线圈电流基波正弦和余弦系数、接收线圈电流 3 次谐波分量的正弦和余弦系数等 9 个未知参数的非线性函数集。利用牛顿迭代法对函数集进行迭代计算，根据迭代误差最终确定互感、负载电压、输出功率和补偿电容等参数的辨识结果。该方法的计算量较大，若要实现有效的在线辨识，对控制器的计算速度和精度要求较高。文献[41]则针对双发射端−单接收端的 WPT 系统，利用 2 个辅助电容器使系统工作在 3 种操作模式，如图 6 所示。图中：T_{X1} 和 T_{X2} 为 2 个发射端电路；U_{d1} 和 U_{d2} 分别为 T_{X1} 和 T_{X2} 的母线电压；L_2 为 T_{X2} 的补偿电感；C_2 为 T_{X2} 的并联补偿电容；C_{tx2} 为 T_{X2} 的串联补偿电容；C_{tx1} 为 T_{X1} 的串联补偿电容；ΔC_{tx1} 和 ΔC_{tx2} 分别为 T_{X1} 和 T_{X2} 的辅助电容；S_p 和 S_q 分别为与 ΔC_{tx1} 和 ΔC_{tx2} 相连的开关；L_{tx1}、L_{tx2} 分别为 T_{X1} 和 T_{X2} 中的发射线圈自感；L_{rx} 为接收线圈自感；M_1、M_2 和 M_{12} 分别为 L_{tx1}、L_{tx2} 和 L_{rx} 之间的互感；C_{rx} 为二次侧补偿电容；R 为电池充电等效负载。通过分析每种工作模式下系统基波和谐波特性，进而推导了综合 3 种操作模式信息的参数辨识整体模型。最后，利用非线性状态估计器对辨识模型进行数值求解，获得了负载、双互感和补偿电容等参数的辨识结果。

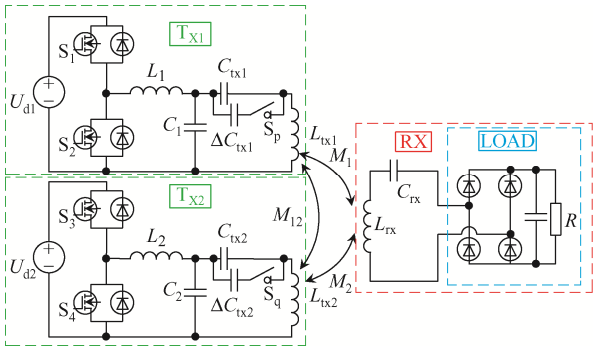


图 6 基于辅助电容器的双发射端−单接收端 WPT 系统

Fig. 6 WPT system with dual transmitters and single receiver based on auxiliary capacitors

3 参数辨识技术亟待解决的问题

尽管 WPT 系统参数辨识技术已取得了一定的理论研究和实验成果，但仍有一些问题亟待解决，主要包括以下方面。

(1)精确性和在线实时性。对于 WPT 系统，参数辨识技术的最大优势在于基于参数辨识结果进行系统控制和参数监测可以简化系统电路设计。因此，参数辨识方法的精确性与在线实时性对系统后续的稳定控制有着重大影响，应同时考虑。此外，对于参数连续变化的应用场景，参数辨识过程不能影响系统工作。目前较多的辨识方法难以同时满足上述要求。

(2)通用性和兼容性。WPT 系统有多种补偿拓扑，如 S-S 补偿、S-P 补偿、LCC/S 补偿和双边 LCC 补偿等。电池负载在整个充电阶段，其等效充电负载变化范围较大。目前的辨识方法通常仅适用于某一特定补偿拓扑，或仅限于较小的充电等效负载变化范围，具有一定局限性。例如，在恒流充电阶段，充电等效负载变化范围较小，且整流桥工作于连续模式，负载能被辨识；而在恒压充电阶段，充电等

效负载将逐渐增大，并使整流桥工作于断续模式，此时负载值难以被辨识。

(3)环境适应性和校准问题。WPT 技术因其优势可广泛应用于高电压、油田钻采、深海和水下探测等特殊场景。在这些应用场景中，往往存在较恶劣的环境条件。环境条件(如温度、湿度和电磁干扰)的变化，可能引起器件的参数漂移，进而影响参数辨识精度，尤其对需要采集交流信息、谐波信息等的辨识方法，影响更加显著。如何结合环境情况进行参数校准也是一个需要解决的问题。

4　总结与展望

本文针对目前 WPT 系统参数辨识技术的研究现状，从互感辨识、互感和负载同时辨识及多参数联合辨识 3 个方面进行分析讨论。可以看出，参数辨识技术已从负载和互感参数辨识发展为包括线圈自感、补偿电容、输出电压和电流等的多参数联合辨识，以适应更多应用场景。尽管参数辨识技术已经取得了一定的进展，但仍有诸多问题有待解决，如参数辨识技术的精确性和在线实时性、通用性和兼容性，以及环境适应性和校准问题。

在未来，随着 WPT 系统应用场景复杂性增加，多参数联合辨识仍将是重要的研究方向。此外，WPT 系统参数辨识涉及电子工程、控制理论、信号处理等多个学科，为了进一步推动其发展，还需开展跨学科研究，加强合作与交流。总之，WPT 系统参数辨识技术在未来将继续发挥重要作用，为 WPT 系统的设计和优化提供技术支持。随着技术的不断进步，相信这一领域的研究将取得更多突破和创新。

参考文献：

[1] 钱林俊, 于博泉, 刘亚兵, 等. 具有抗偏移及漏电场屏蔽特性的 UUV 电场耦合无线电能传输系统[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 254-263.
Qian Linjun, Yu Boquan, Liu Yabing, et al. Electric-field coupled wireless power transfer system for UUV with anti-offset and leakage field shielding characteristics [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 254-263. (in Chinese)

[2] Li Siqi, Mi C C. Wireless power transfer for electric vehicle applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 4-17.

[3] 杨庆新, 章鹏程, 祝丽花, 等. 无线电能传输技术的关键基础与技术瓶颈问题[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 1-8.
Yang Qingxin, Zhang Pengcheng, Zhu Lihua, et al. Key fundamental problems and technical bottlenecks of the wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 1-8. (in Chinese)

[4] 张献, 王朝晖, 魏斌, 等. 电动汽车无线充电系统中电屏蔽对空间磁场的影响分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1580-1588.
Zhang Xian, Wang Zhaohui, Wei Bin, et al. Analysis of the influence of electric shield on space magnetic field in electric vehicle wireless charging system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1580-1588. (in Chinese)

[5] 田继浩, 周凌云, 刘顺攀, 等. 基于压控电容的无人机 WPT 系统高效率恒流/恒压输出调节方法[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 244-253.
Tian Jihao, Zhou Lingyun, Liu Shunpan, et al. High-efficiency CC/CV output regulating method for UAV-WPT system based on voltage-controlled capacitor [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 244-253. (in Chinese)

[6] 吴理豪, 张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述(下篇)[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1662-1678.
Wu Lihao, Zhang Bo. Overview of static wireless charging technology for electric vehicles: Part Ⅱ [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1662-1678. (in Chinese)

[7] 窦润田, 张献, 李永建, 等. 磁耦合谐振无线电能传输系统电磁屏蔽应用发展与研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6020-6039.
Dou Runtian, Zhang Xian, Li Yongjian, et al. Review of application development and research of electromagnetic

shielding in magnetic coupling resonant wireless power transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6020-6039. (in Chinese)

[8] 孙晶, 朱军, 刘华, 等. 谐振式无线电能传输技术在无人机的应用研究[J]. 电子科技, 2019, 32(4): 49-53.
Sun Jing, Zhu Jun, Liu Hua, et al. Research on UAV application of magnetic resonance coupling wireless power transmission system [J]. Electronic Science and Technology, 2019, 32(4): 49-53. (in Chinese)

[9] 吴垣甫, 孙梦云, 雷宇. 无线电能传输技术在水下的应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(12): 195-197, 201.
Wu Yuanfu, Sun Mengyun, Lei Yu. Research on application of wireless power transmission technology in underwater [J]. Automation & Instrumentation, 2018(12): 195-197, 201. (in Chinese)

[10] 项飞, 钟文兴. 基于垂直解耦线圈组的 WPT 系统金属异物检测方法[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 258-266.
Xiang Fei, Zhong Wenxing. Metal object detection method for WPT system with vertically decoupled coil sets [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 258-266. (in Chinese)

[11] 张献, 邢子瑶, 薛明, 等. 无线电能传输系统异物检测技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 793-807.
Zhang Xian, Xing Ziyao, Xue Ming, et al. Overview of foreign object detection in wireless power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 793-807. (in Chinese)

[12] 李中启, 张晨曦, 王建斌, 等. 基于变频重构 S/SP 拓扑的无线电能传输系统恒流恒压研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4718-4732.
Li Zhongqi, Zhang Chenxi, Wang Jianbin, et al. Research on constant current and constant voltage of WPT system based on variable frequency reconfiguration S/SP topology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4718-4732. (in Chinese)

[13] 李阳, 石少博, 刘雪莉, 等. 磁场耦合式无线电能传输耦合机构综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 389-403.
Li Yang, Shi Shaobo, Liu Xueli, et al. Overview of magnetic coupling mechanism for wireless power transfer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 389-403. (in Chinese)

[14] 曾玉凤, 丘东元, 张波. 磁谐振无线电能传输系统线圈设计综述[J]. 电源学报, 2019, 17(4): 94-104.
Zeng Yufeng, Qiu Dongyuan, Zhang Bo. Review of coil designs for magnetic resonant wireless power transfer system [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(4): 94-104. (in Chinese)

[15] 秦庆磊, 张昌州, 王中训. 无线电能传输系统金属异物检测方法研究[J]. 电源学报, 2023, 21(2): 194-200.
Qin Qinglei, Zhang Changzhou, Wang Zhongxun. Research on detection method for metallic foreign bodies in wireless power transmission system [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(2): 194-200. (in Chinese)

[16] 王懿杰, 陆凯兴, 姚友素, 等. 具有强抗偏移性能的电动汽车用无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3907-3916.
Wang Yijie, Lu Kaixing, Yao Yousu, et al. An electric vehicle (EV)-oriented wireless power transfer system featuring high misalignment tolerance [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3907-3916. (in Chinese)

[17] Hou Jia, Chen Qianhong, Zhang Zhiliang, et al. Analysis of output current characteristics for higher order primary compensation in inductive power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 6807-6821.

[18] Dai Xin, Jiang Jincheng, Xu Zhou, et al. Cooperative control for multi-excitation units WPT system with multiple coupling parameter identification and area adaptation [J]. IEEE Access, 2020, 8: 38728-38741.

[19] Dai Xin, Li Xiaofei, Li Yanling, et al. Maximum efficiency tracking for wireless power transfer systems with dynamic coupling coefficient estimation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5005-5015.

[20] Mai Ruikun, Liu Yeran, Li Yong, et al. An active-rectifier-based maximum efficiency tracking method using an additional measurement coil for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 716-728.

[21] Sagar A, Kashyap A, Nasab M A, et al. A comprehensive review of the recent development of wireless power transfer technologies for electric vehicle charging systems

[J]. IEEE Access, 2023, 11: 83703-83751.

[22] Patil D, McDonough M K, Miller J M, et al. Wireless power transfer for vehicular applications: Overview and challenges [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 3-37.

[23] Jiwariyavej V, Imura T, Hori Y. Coupling coefficients estimation of wireless power transfer system via magnetic resonance coupling using information from either side of the system [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(1): 191-200.

[24] Chow J P, Chung H S, Cheng C S. Use of transmitter-side electrical information to estimate mutual inductance and regulate receiver-side power in wireless inductive link [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6079-6091.

[25] Yang Yun, Tan S C, Hui S Y R. Fast hardware approach to determining mutual coupling of series-series-compensated wireless power transfer systems with active rectifiers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 11026-11038.

[26] Wang Lei, Sun Pan, Wu Xusheng, et al. Mutual inductance identification of IPT system based on soft-start process [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7504-7517.

[27] Mohammad M, Choi S. Sensorless estimation of coupling coefficient based on current and voltage harmonics analysis for wireless charging system [C]// 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati, OH, USA, 2017: 2767-2772.

[28] Hu Jianghao, Zhao Jiankang, Cui Chao. A wide charging range wireless power transfer control system with harmonic current to estimate the coupling coefficient [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 5082-5094.

[29] Su Yugang, Zhang Hongyan, Wang Zhihui, et al. Steady-state load identification method of inductive power transfer system based on switching capacitors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6349-6355.

[30] Sheng Xuerui, Shi Liming. Mutual inductance and load identification method for inductively coupled power transfer system based on auxiliary inverter [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2): 1533-1541.

[31] Su Yugang, Chen Long, Wu Xueying, et al. Load and mutual inductance identification from the primary side of inductive power transfer system with parallel-tuned secondary power pickup [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9952-9962.

[32] Dai Ruimin, Zhou Wei, Chen Yonghong, et al. Pulse density modulation based mutual inductance and load resistance identification method for wireless power transfer system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9933-9943.

[33] 苏玉刚, 陈龙, 吴学颖, 等. 基于遗传算法的 SS 型磁耦合 WPT 系统负载与互感识别方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4199-4206.
Su Yugang, Chen Long, Wu Xueying, et al. Load and mutual inductance identification method of SS-type magnetically-coupled WPT system based on genetic algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4199-4206. (in Chinese)

[34] 苏玉刚, 阳剑, 戴欣, 等. 基于 TensorFlow 神经网络的 MCR-WPT 系统负载与互感识别方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 162-169.
Su Yugang, Yang Jian, Dai Xin, et al. TensorFlow neural network based load and mutual inductance identification method for magnetic coupling resonant wireless power transfer system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 162-169. (in Chinese)

[35] Guo Yanjie, Zhang Yuwang, Li Shufan, et al. Load parameter joint identification of wireless power transfer system based on the DC input current and phase-shift angle [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10542-10553.

[36] Guo Yanjie, Zhang Yuwang, Zhang Wenjie, et al. Battery parameter identification based on wireless power transfer system with rectifier load [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 6893-6904.

[37] Wang Lei, Sun Pan, Liang Yan, et al. Joint real-time identification for mutual inductance and load charging parameters of IPT system [J]. IEEE Journal of Emerging

and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(4): 4574-4590.

[38] 郭微, 张健. 电动汽车无线充电系统耦合线圈的优化设计[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2021, 34(4): 36-43.
Guo Wei, Zhang Jian. Optimal design of coupling coil for wireless charging system of electric vehicle [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2021, 34(4): 36-43. (in Chinese)

[39] Li Weihan, Wei Guo, Cui Chao, et al. A double-side self-tuning LCC/S system using a variable switched capacitor based on parameter recognition [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 3069-3078.

[40] Liu Junwei, Wang Guibin, Xu Gang, et al. A parameter identification approach with primary-side measurement for DC-DC wireless-power-transfer converters with different resonant tank topologies [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1219-1235.

[41] Yue Kang, Liu Yu, Fu Minfan, et al. Mode switching based parameter identification for 2TX-1RX wireless power transfer systems [J]. IEEE Access, 2023, 11: 46847-46859.

[42] Liu Junwei, Chan K W, Chung C Y, et al. Single-stage wireless-power-transfer resonant converter with Boost bridgeless power-factor-correction rectifier [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2145-2155.



张玉旺

作者简介：

张玉旺(1989—)，男，博士，讲师。研究方向：无线电能传输，系统参数辨识与控制，电动汽车无线充电。E-mail：zhangyuwang@hebust.edu.cn。

都义彬(2000—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：无线电能传输。E-mail：DYBYX13633902045@163.com。

张岩(1983—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：电磁兼容与电磁环境效应，智能感知与人工智能。E-mail：yanyanfly163@163.com。

郭彦杰(1986—)，男，博士，副研究员。研究方向：无线电能传输，系统参数辨识与状态估计，电磁兼容。E-mail：yjguo@hebut. edu.cn。

薛明(1987—)，男，博士，高级实验师。研究方向：无线电能传输。E-mail：2023064@hebut. edu.cn。

(责任编辑：耿越)